DOI: 10.5846/stxb201608061620
朱鹏颐,黄新焕.共生理论视角下创新农业生态经济研究范式.生态学报,2017,37(20):6945-6952.
Zhu P Y, Huang X H.Innovative research paradigm of agricultural eco-economy from the perspective of symbiosis theory.Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6945-6952.

共生理论视角下创新农业生态经济研究范式

朱鹏颐*,黄新焕
福建师范大学 经济学院,福州 350117

摘要:共生理论认为异质共生生物在其生存过程中会表现出相互依存的关系。试图将这一论点移植到农业生态经济研究中,用以处理农业生产中生态效益与经济效益之间矛盾的问题。为此,把农业生态经济视为由生态单元与经济单元组成的异质共生体,分析了该共生体的结构与共生模式,并采用 Logistic 方程与数值模拟方法,探讨农业生态经济共生体的共生机制,揭示共生单元间的演化规律与成长特征。研究表明:共生模式在农业实践上创新应用的主要目标是将共生体从寄生共生模式向互惠共生模式转型,并提出正向转型的激励策略。共生单元的选择必须具有兼容性,共生单元间有明确的共生界面,促使物质、能量和信息的交流,以增加共生体内自由能。共生关系正向发展要遵循共生演进规律,偏利共生模式是演进到互惠共生模式的必经过程。培育互惠共生适存的共生环境对促进共生体演进至关重要。这些研究成果为农业生态经济研究提供一个新范式,并开创一条研究新思路与方法。

关键词:农业生态经济;共生理论;共生机制;创新研究范式

Innovative research paradigm of agricultural eco-economy from the perspective of symbiosis theory

ZHU Pengyi*, HUANG Xinhuan
School of Economics, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, *China*

Abstract: Symbiosis theory reveals that creatures with heterogeneous symbiosis are interdependent with each other during the survival period. The present study attempts to place this theory into the eco-economy research field to solve the contradiction problems between ecological benefit and economic benefit in agriculture. For this purpose, the agricultural eco-economy was regarded as a heterogeneous symbiont consisting of an ecological unit and an economic unit. The structure and symbiotic patterns of the eco-economy symbiont were analyzed. The symbiotic mechanism of the eco-economy symbiont was explored with the Logistic equation and numerical simulation. The evolution rules and formative characteristics of the symbiont were revealed. The research showed that the main goal of innovative applications of symbiosis models in agricultural practices is the regulation of the symbiont to transform from the parasitism model to the mutualism model, and the excitation strategy of the positive transition was proposed. The choice of symbiotic units must be of a compatible nature and there must be a clear symbiotic interface between symbiotic units, prompting the exchange of matter, energy and information for enhancing the number of free energy within the symbiont. The positive development of a symbiotic relationship follows the rules of symbiotic evolution, the commensalism model is an inevitable process of the evolution to reach the mutualism model. Fostering the symbiotic environment for mutualism is very important for the evolution of the symbiont. The research results provide a new paradigm and opens up new thoughts and methods for research of the

基金项目:福建省科学技术项目"海峡西岸经济区农业生态经济现状评价与发展策略研究"(2010R0046)
收稿日期:2016-08-06; **网络出版日期**:2017-06-01
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: hjzhu6@163.com

agricultural eco-economy.

Key Words: agricultural eco-economy; symbiosis theory; symbiotic mechanisms; innovative research paradigm

在全球环境变化,生态面临危机中,生态与经济的融合始终是研究的主题。经济效益主要涉及当前和局部利益。而生态环境效益则涉及到长远与宏观利益。因此经济价值标准与生态价值标准之间存在明显冲突,协调两者矛盾是当前研究的棘手问题。随着经济规模不断扩大,生态环境退化日益严重。于是提出退化生态恢复问题,但一些地方过度强调生态恢复而忽视了人类的经济需要,致使生态恢复缺乏动力。实际上生态恢复不仅是一个生态过程,也是经济价值提升过程,只有两者融合,生态恢复才能持续稳定。这个问题已经引起许多学者的重视,当前文献所见研究热点主要集中在系统耦合概念上,焦点在"系统耦合模式[1]"、"系统耦合态势[2-3]"、"系统耦合效应[4]"方面,而"系统耦合过程模型"研究相对滞后[5]。于是在经济与生态环境的关系上缺乏一个有说服力的融合理论。共生理论为解决这个问题提供理论基础。共生理论出于生物学。Scott[6]提出共生是两个或多个生物,在生理上相互依存程度达到平衡的状态。这是生物种群生态学种间关系分析的方法论。随后许多学者把这一方法论广泛应用于许多领域[7-8],如工业[9]、金融业[10-11]、城市管理[12]、企业管理[13-14]和农业[15-16]等。在农业中,主要应用于经营模式、特色农业和休闲农业等方面的研究。本文另辟一个新路径,把共生理论引入农业生态经济研究中,把经济单元与生态单元视为共存于农业生态经济共生体中的两个独立单元的异质共生。正由于存在这种异质性,才使多个共生单元在生存过程中能够建立更加相互依存的关系[17],并表现出更强的互补性。一个共生单元的生存发展以其它共生单元的存在为前提,同时又以它自身的存在强化着其它共生单元的生存本领。这种互补性是共生体共同进化和结构更新的基础,为生态与经济"双赢"找到理论依据。遍查国内外文献,共生理论在诸多领域上广泛应用,唯独未见在生态与经济上融合上的研究报道(中国科学技术信息研究所科技查新报告,编号 20141100100613)。

1 农业生态经济共生机制

1.1 共生体的构成

农业生态经济共生体是由农业生态共生单元与农业经济共生单元构成的。农业生态共生单元是由农业生态环境和农业生物种群两大要素构成。其中,农业生态环境包括农作物生长所依赖的气候、土壤、水等环境要素;农业生物种群则包括种植业、林业、畜牧业和渔业等所涉及到的动物、植物和微生物种群。农业经济共生单元主要由农业投入与农业产出两大要素构成。其中,农业投入包括劳动力、技术、资金投入。农业产出包括各类农产品及其加工品产量及产值。农业经济共生单元边界以内的集合体以完成其经济功能为目标,而农业生态共生单元边界以内的集合体以完成其生态功能为目标。共生界面为共生单元之间的能量流、物质流、信息流和价值流提供顺畅的通道,促进共生体的演进与发展。于是经济共生单元保证了生态共生单元发展的物质基础,而生态共生单元提供经济共生单元发展的适宜自然条件,同时又消化和处理经济共生单元产生的各种产物,两者相互交织、相互作用构成共生体(图 1)。

1.2 共生模式的形成

共生单元是构成共生体的基本能量生产和交换单位,共生单元之间依靠共生界面传导能量而发生关系,两个共生单元通过共生界面接触之后将产生共生能量并进行分配,从而构成共生模式,这体现了单元之间共生关系的本质。共生模式的形成及演化发展的外在条件构成共生环境。共生单元、共生模式、共生环境 3 个要素构成共生体。

共生模式有寄生共生、偏利共生、互惠共生等模式。寄生共生表现为在共生单元之间一种单向的物质或能量转移,有利于共生单元的一方发展而不利于另一方发展。一些地区由于掠夺式经营土地,能量单向经济共生单元转移,影响到生态共生单元的活力,导致共生环境受损,形成寄生共生模式。偏利共生模式表现为在

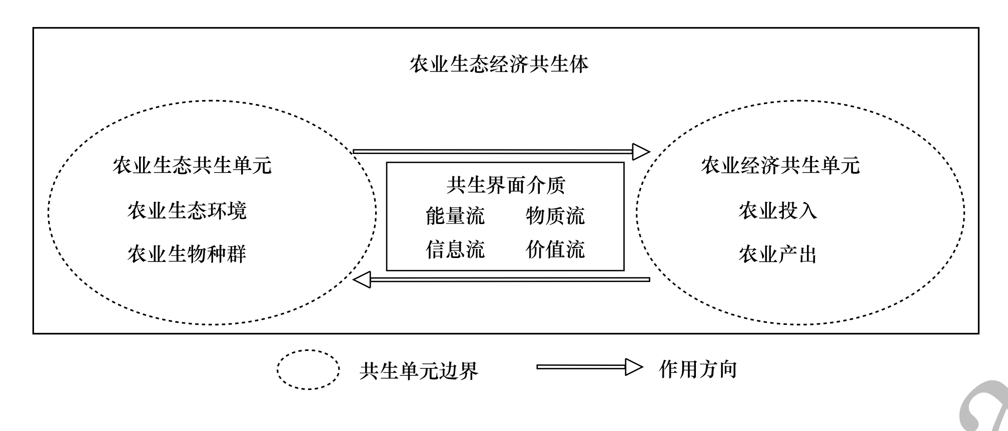


图 1　农业生态经济共生体结构

Fig.1　Symbiont structure of agro-eco-economy

共生单元之间表现能量的分配虽然集中于某一方,但另一方没有净损失。发展农业生态经济,在资源承载量与环境容量许可的状况下,经济共生单元的发展并不对生态共生单元产生影响,这期间尽管经济共生单元快速发展,但不损害生态共生单元,这属于偏利经济共生模式。而在生态环境严重退化地区,虽然生态共生单元有所发展,但未达到一定水准,仍然不对经济共生单元产生影响,这属于偏利生态共生模式。互惠共生表现为共生单元之间能量双向分配,如经济与生态两个共生单元共同得利,新的能量源源不断地产生,促进共生关系演化与发展,形成互惠共生模式。这是发展农业生态经济的最佳模式。在寄生共生模式转型到互惠共生模式的过程中往往出现过渡性的偏利共生模式。

1.3　共生关系演化规律与成长特征

掌握共生关系的演化规律与成长特征是应用共生理论研究农业生态经济的先行条件。农业生态共生单元中输出的能量应遵循投入产出相适应法则,其输入量和输出量(对应经济共生单元的输入量)之间存在非线性、负反馈为特征的演化关系。Logistic 方程恰能描述在环境容量限制下,由正反馈力和负反馈力综合作用而导致的非线性的 logistic 曲线式增长。Logistic 方程已应用于工业[18]、城市管理[19]、企业管理[20]、农业管理[21-22]等方面。尚未有 Logistic 方程在农业生态经济研究中创新应用。因此,本文尝试利用 Logistic 方程来描述农业生态经济共生体演化过程中共生单元内部的增长规律及共生单元间的相互作用关系,进而考察共生模式间的转化关系,以谋取最佳模式。

1.3.1　共生关系演化规律

假设当经济共生单元和生态共生单元单独存在于农业生态经济共生体时,其发展演化均遵从 Logistic 规律。

记 $x_1(t)$ 是农业经济生态共生体中经济共生单元的能量规模, r_1 是经济共生单元能量的固有增长率, N_1 是环境对经济共生单元独自成长的最大容量。那么,对于经济共生单元,有:

$$\mathrm{d}x_1/\mathrm{d}t = r_1x_1(1 - x_1/N_1)$$

式中,因子 $(1 - x_1/N_1)$ 表示由于经济共生单元成长过程中对有限资源的消耗而产生的对其本身规模增长的阻滞作用, x_1/N_1 为经济共生单元消耗的资源占总资源的比例。

记 $x_2(t)$ 是农业经济生态共生体中生态共生单元的能量规模, r_2 是生态共生单元能量的固有增长率, N_2 分别是环境对生态共生单元独自成长的最大容量。那么,对于生态共生单元,有:

$$\mathrm{d}x_2/\mathrm{d}t = r_2x_2(1 - x_2/N_2)$$

式中,因子 $(1 - x_2/N_2)$ 表示由于生态共生单元成长过程中对有限资源的消耗而产生的对其本身规模增长的阻滞作用, x_2/N_2 为生态共生单元消耗的资源占总资源的比例。

当经济共生单元与生态共生单元在同一农业生态经济共生体时,共生关系可能有互惠共生、偏利共生和寄生共生 3 种模式。这 3 种模式将产生不同的效应。如上所述,互惠共生由于一个共生单元的存在而使另一

共生单元发展得更好;偏利共生则是两个共生单元在成长的过程中一共生单元受益而另一共生单元既无益又无害;寄生共生则其中一个单元的增长将对另一单元产生负效应。

据此关系,对于经济共生单元 $x_1(t)$,应在因子 $(1 - x_1/N_1)$ 中引入共生单元的共生系数。共生系数的大小表示共生效应大小。在共生条件下,经济共生单元的演化动力学方程为:

$$dx_1/dt = r_1x_1(1 - x_1/N_1 - b_1x_2/N_2) \tag{1}$$

同理,可得到生态共生单元的演化动力学方程为

$$dx_2/dt = r_2x_2(1 - x_2/N_2 - b_2x_1/N_1) \tag{2}$$

式中, b_1 表示生态共生单元对经济共生单元的共生系数, b_2 表示经济共生单元对生态共生单元的共生系数。

根据 b_1 和 b_2 不同的取值组合,可以判断农业生态经济共生体的共生关系,如表 1 所示。

表 1 农业生态经济共生体的共生关系

Table 1 The symbiotic relationship of the agro-eco-economic symbiont

取值组合 Values combination	共生关系 Symbiotic relationship
b_1、b_2 同为负数	互惠共生模式(理想状态);若两个共生系数为负但不相等,则两个共生单元互惠程度不同;若两个共生系数为负且相等,则为典型的互惠共生模式
b_1、b_2 同为正数	若共生系数为正且相等,则为平等竞争模式。若共生系数为正但不相等,且任意一个共生系数大于 1,则为恶性竞争模式
b_1、b_2 异号	寄生共生模式,共生系数为负的单元受益,而共生系数为正的单元受损
b_1、b_2 中一个为零,一个为负数	偏利共生模式,共生系数为负的单元受益,共生系数为 0 的单元无影响
b_1、b_2 均为零	独立共存模式,两个单元彼此互不影响

1.3.2 共生模式成长特征

由于农业生态经济共生体中的经济共生单元和生态共生单元间的共生关系演化需要较长时间,实证研究等方法较难刻画两者共生关系的演化过程。而计算机仿真则可以较好地反映农业生态经济共生体在特定情境下动态变化的过程,反映出共生模式的成长特征。

为了形象说明单元间共生系数对系统共生关系演化的影响,本文假设经济共生单元与生态共生单元能量的固有增长率分别为 $r_1 = 0.15$, $r_2 = 0.05$,环境支持它们单独成长的最大容量 $N_1 = N_2 = 1500$,演化周期为 1600。利用 Matlab 2008 对公式(1)和(2)进行模拟,探讨在 b_1 和 b_2 的不同取值组合下,经济共生单元和生态共生单元的共生关系的演化过程。在仿真实验中,利用 b_1、b_2 的其它取值进行仿真实验的敏感性分析,实验结果虽然在数值上略有差异,但在趋势和规律上和本文所分析结果一致。仿真结果如图 2—图 7 所示。

由图 2 可知, $b_1 = -0.3$, $b_2 = -0.1$ 时,经济共生单元与生态共生单元互惠共生,各共生单元能量规模上限都朝着大于单独成长时最大规模的方向演化,最终在不同上限达到稳定状态。并由此得知,各共生单元规模上限的增幅与共生系数有关,共生系数的绝对值越大,规模上限增幅越大。

由图 3 可知, $b_1 = 0.3$, $b_2 = 0.1$ 时,经济共生单元与生态共生单元竞争共生,某一共生单元的成长会抑制另一共生单元的成长,两个共生单元达到稳定状态时,规模上限低于单独成长时最大规模。由于 $b_1 > b_2$,生态共生单元成长对经济共生单元成长的抑制作用更大,最终经济共生单元的规模上限比生态共生单元小。

由图 4 可知,当 $b_1 = 1.4$, $b_2 = 0.8$ 时,经济共生单元与生态共生单元处于恶性竞争模式,共生系数大于 1 的经济共生单元被生态共生单元抑制而率先灭绝,生态共生单元则独立成长发展,能量规模上限小于单独成长时最大规模。

由图 5 可知,当 $b_1 = 0.3$, $b_2 = -0.2$ 时,经济共生单元与生态共生单元处于寄生共生模式,经济共生单元的成长受到生态共生单元的抑制,而经济共生单元则促进生态共生单元的成长。当两个共生单元处于平衡状态时,经济共生单元规模上限低于单独成长时最大规模,而生态共生单元的规模上限高于单独成长时最大规模。

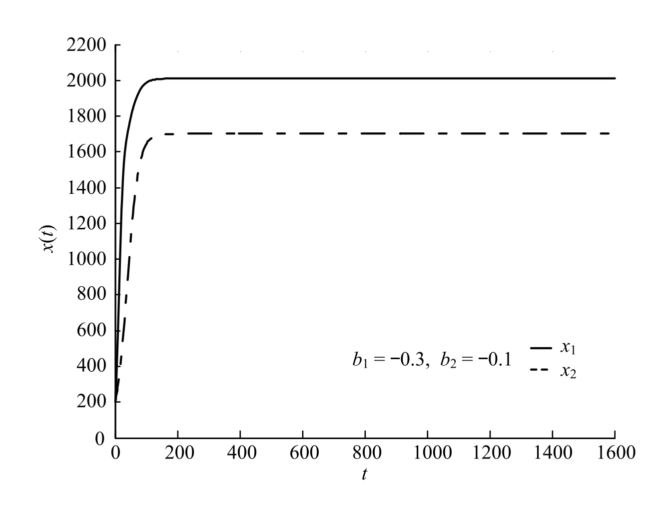


图 2　互惠共生模式

Fig.2　Mutualism model

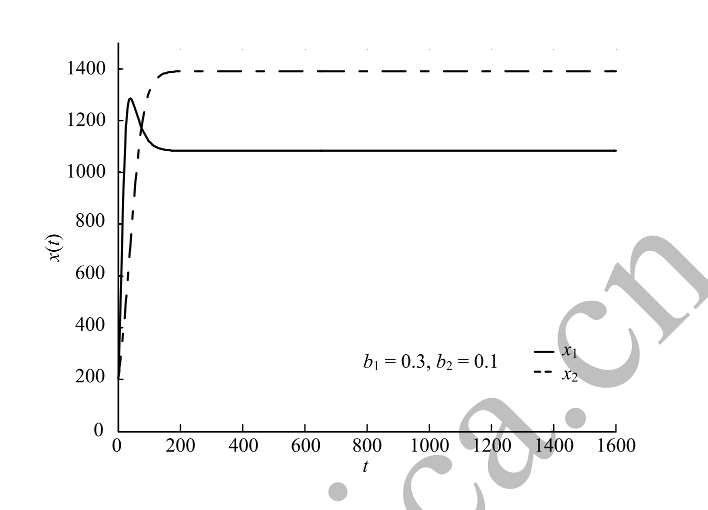


图 3　竞争共生模式

Fig.3　Competitive symbiosis model

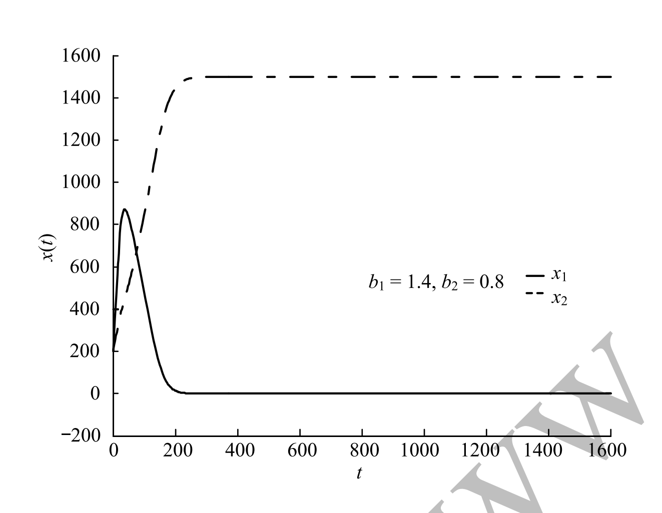


图 4　恶性竞争模式

Fig.4　Vicious competition model

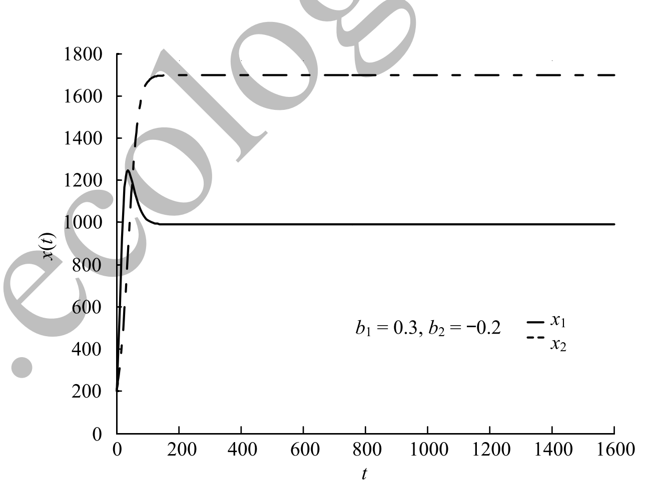


图 5　寄生共生模式

Fig.5　parasitism model

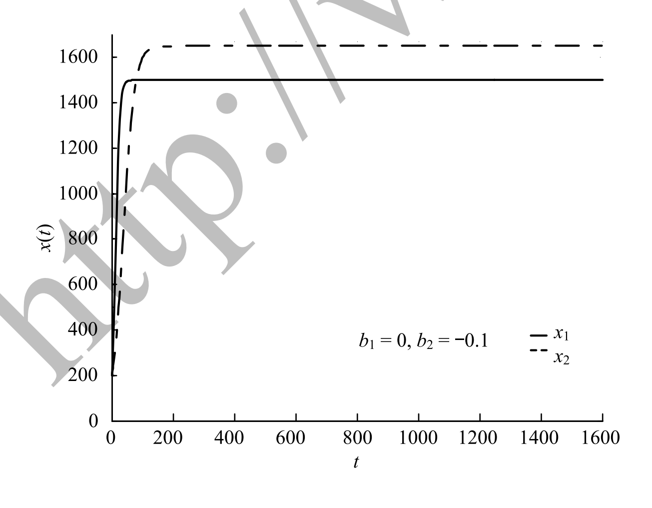


图 6　偏利共生模式

Fig.6　commensalism model

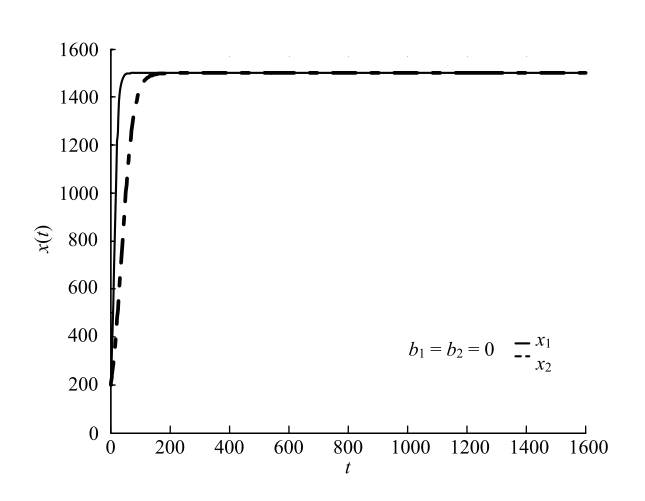


图 7　独立共存模式

Fig.7　Independent coexistence model

由图 6 可知,当 $b_1=0$, $b_2=-0.1$ 时,经济共生单元与生态共生单元处于偏利共生模式,经济共生单元的成长不受生态共生单元的影响,而经济共生单元则促进生态共生单元的成长。当两个共生单元处于平衡状态时,经济共生单元规模上限等于单独成长时最大规模,而生态单元规模上限高于单独成长时最大规模。

由图 7 可知,当 $b_1=b_2=0$ 时,经济共生单元与生态共生单元处于独立共存模式,两个共生单元互不影响。当两个共生单元处于平衡状态时,经济共生单元和生态共生单元的规模上限为单独成长时最大规模。

2 在农业领域应用的激励策略

异质共生存在着正向(演进)与反向(退化)两种可能性。既可以出现共生单元之间的相互吸引、相互合作、相互补充以及相互促进[23],也可能以性质相反的面目出现[24-25]。在实际操作中,要紧紧把握互惠共生是共生体演进的根本法则, 应用激励策略,促其向互惠共生模式转型。

2.1 选择互惠的共生对象

农业生产不仅提供人类所需要的物质,而且同时具有调节大气成分(吸收 CO_2、释放 O_2)、净化大气(吸收大气污染物、滞尘) 、涵养水分、保持水土和维持营养物质循环等生态服务功能。而且后者所创造的价值要高于前者的 10 倍以上[26]。农业这种生产功能与生态服务功能相互交织的特性,更易于建立起基于共同利益的兼容关系。农业又是"多样性"的产业,包括种植业、林业、畜牧业、渔业、农产品加工业和涉农服务业,这又为选择共生对象提供极有利的条件。这些特性恰是形成正向共生关系的最好基础。而打下这个基础的前提是选对共生对象。关于这一问题,许多学者作了探究。张小峰等提出:共生伙伴的选择要求共生单元间关联度不低于一个临界值。任何单元都会以能力强、匹配性好的单元作为优选共生对象[27]。Zaccaro 等[28]认为:共生单元之间的合理分工, 产生共生能量。Fortin 等[29]和 Cote 等[30]提出了共生网络概念,他们认为从"资源-产品-废品"转变成为"资源-产品-再生资源"的模式仅仅停留在副产品交换上没有任何稳定性保障,必须构建共生网络的稳定性,即在各产业之间相互关联的基础下,当内部或外部环境发生变化时,产业链内部能够保持稳定循环的状态,使得共生网络的发展具有韧性。正向共生关系的共生对象选择必须是共生体内各共生单元间存在确定的共生界面,具有内在性质的兼容,能按某种方式进行物质、信息和能量的交流,促使体内自由能的不断增加,能形成整体结构和功能远大于各共生单元之和的共生体。为使这一说法有操作可行性,先从模拟自然界生物群体的共生现象入手, 从中选出关联性大的共生对象。如模拟食物链原理的生态共生。福建省马坪镇虽然自然条件优越,但早期实行以水稻为主的耕作制,共生密度小,加以园地开发经营不当,导致水土流失,经济单元和生态单元两者共生系数异号,处于寄生共生模式。2001 年模拟食物链原理,选择若干个兼容共生单元共生,即在果园中种植牧草,以牧草发展畜牧业,再以动物粪便培育食用菌,再以菌渣作果树肥料,形成多单元的匹配链,共生密度增加,通过各共生单元之间的能流、物流、信息流以及人类活动价值流的有序输入输出,相应增强共生作用,以至形成经济单元和生态单元两者共生系数同为负数的新共生体,其生态效益和经济效益比传统农业分别提高 59%和 41%[26],实现了互惠共生模式。由此看出,选择共生对象的要害在于关联度。目前一些地区实施农业多种经营方式,尽管增加共生密度,但因共生单元之间的关联性不大,收效也不大。如福建省森林覆盖率虽为全国之冠,但因缺乏成熟合理的林农复合经营手段,共生体内各共生单元关联性不大,导致经济效益仍然低下。马坪镇还依据生态位原理组成立体空间共生。以庭院养殖(以养蜂、养牛、栽菇为主)为纽带,将高丘林(园)地 (以生态防护和林业开发为主)、低丘园地 (以坡地果园套种、间种牧草开发为主)、平地耕地 (以粮-经-饲种植为主)和洼地水域 (以淡水养殖)协调构建高空-高丘-低丘-平地-洼地多层次的物质与能量空间循环。这种立体空间共生体不仅地力提高,而且单位面积的收入比一般大田高 6—8 倍,农民人均纯收入增长在 8.8%以上[31-32]。此外,自然界还有生理共生(豆科植物与禾本科植物共生)、时序共生(植物自然替代)等多样共生现象可以模拟。从自然界共生现象中提炼出适宜的共生对象,既涉及物种搭配、部门联合、空间配置和时序安排,又涉及共生单元数量、序列、共生单元间关联性等技术。这些都是当前技术创新的重要课题。

2.2 顺乎共生演进规律

选择适当对象构建共生体之后,双方进入共生的适应、整合过程,先在结构和功能上进行调整,以实现彼此间的相互适应,继则相互作用产生新能量,不断演进,这是一种自组织过程,表现开放性、非线性以及涨落性等特点。作者评估 2004—2010 年福建省农业生态经济发展态势时已经发现这一现象[33]。当 2004—2005 年经济发展缓慢,共生体处于偏利生态共生模式,通过激发经济共生单元活力之后,及至 2006 年演进成为互惠共生模式。又因经济共生单元能量持续增长,生态共生单元能量供应跟不上与之相匹配,2007—2009 年处在偏利经济共生模式,通过激发生态单元活力之后,2010 年又演进成为高一级水平的互惠共生模式,如图 8 所示。发展的总的趋势是由偏利共生模式到互惠共生模式,再由互惠共生模式达到新的偏利共生模式,随后又出现高一级的互惠共生模式。互惠共生模式与偏利共生模式贯穿于农业生态经济发展全过程,推动农业生态经济从低层次向高层次演化。这反映农业生态经济互惠共生模式需要经过偏利共生模式过程,否则只能是低水平的互惠共生模式。因此可以认为偏利共生模式是农业生态经济互惠共生模式演进的必经过程。

因此共生演进策略的重点是发挥偏利共生模式的过渡性演进作用,引导共生关系正向发展。传统的生态重建偏重于自然生态一方的功能恢复,对经济一方往往关注不够,于是不加区别地提出“生态领先”的口号。实际上生态重建应顺乎共生演进规律,按演进的不同阶段,决定“生态领先”或是“经济领先”。当经济发展到一定程度,生态环境承受了过大压力,甚至出现生态环境退化时要采用生态优先策略。但对于经济欠发达地区来说,经济效益既是目的又是手段。必须通过经济效益的激励手段才能实现生态-经济共生体的形成。

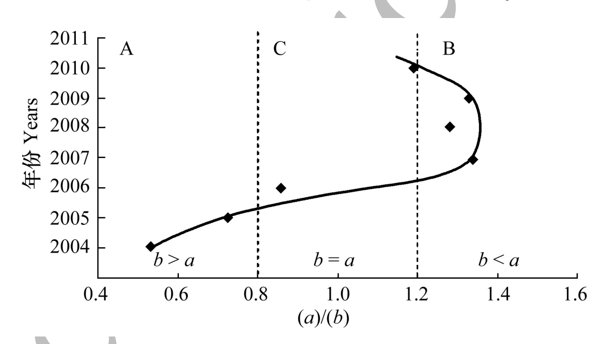


图 8 福建农业生态经济发展趋势图

Fig. 8 Development tendency of agricultural eco-economy in Fujian Province, China

a 表示经济效益值; b 表示生态效益值; A 表示偏利生态共生; B 表示偏利经济共生; C 表示互惠共生

2.3 培育互惠共生适存的共生环境

产生共生能量是互惠共生的最基本的要求,而共生界面对共生能量的形成和提升有着直接的制约作用[34]。如果通过共生界面介质,不仅能缩小共生单元之间的共生时间与成本,而且能扩展共生的维度和密度,其共生效果比界面直接交流更好。这说明共生体的演进固然要顺乎其自身的规律,但也可以采用相应的共生介质接触机制与之相匹配,促进共生体演进与发展。人类可以通过培育共生环境,善于应用共生界面介质,有效构建畅通、连续和稳定的界面,以提高共生单元间能量双向交流的动力,保障互惠共生界面功能有效发挥。科技、体制和政策等都是理想的共生界面介质,当前适应各种不同区域要求的最佳共生模式有待研究,因此要把科学技术作为共生界面介质,促成更多、更有效的共生体,适应各地需求。规模经营形成“大农业”格局,在共生单元之间适应、整合以及产生新能量方面均显示许多优势。因此农业经营体制也是农业生态经济共生体的共生界面介质。其他如生态补偿、农业市场以及各种农业布局都可能成为共生界面介质,影响共生体正向相变。但必须有一个前提,即顺乎共生体的演变规律,也就是说共生环境要与共生体的演变相适应,即培育互惠共生适存的共生环境。

3 结语

在全球环境变化,生态面临危机中,生态与经济的融合始终是研究的主题。当前研究只停留在系统耦合层面上,缺乏一个有说服力的融合理论。而生物异质共生会表现更强的互补性为生态与经济的融合提供很好理论依据,而且自然界有许多生物互惠共生现象可供模拟,为应用打开了广阔的门径。更由于农业是对自然资源和环境依赖最大的产业部门,而且表现生产功能与生态服务功能相互交织的特性,将这个理论用于农业尤为适合。据此,本文论述共生理论在农业生态经济研究中应用的新颖性与优越性,探究其共生机制,揭示偏

利共生模式是形成互惠共生模式的必经过程。强调把握住互惠共生是共生体演化的总方向这一原则,采取相应的共生激励策略,赢得经济效益与生态效益的统一。

参考文献(References):

[1] Voinov A, Costanza R, Wainge L, Boumans R, Villa F, Maxwell T, Voinov H. Patuxent landscape model: Integrated ecological economic modeling of a watershed. Environmental Modelling & Software, 1999, 14(5): 473-491.

[2] 王继军, 姜志德, 连坡, 郭满才, 姜峻, 苏鑫, 李慧, 牛艳丽. 70 年来陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势. 生态学报, 2009, 29(9): 5130-5137.

[3] 唐婷, 李超, 张雷, 吕坤, 周治国. 江苏省区域农业生态经济的时空变异分析. 生态学报, 2014, 34(14): 4025-4036.

[4] 刘兴元, 王锁民, 郭正刚. 半干旱地区农业资源的复合经营模式及生态经济耦合效应研究. 自然资源学报, 2004, 19(5): 624-631.

[5] 王继军, 郭满才, 姜志德, 苏鑫, 李慧, 李奇睿. 农业生态经济系统耦合过程模型的建立及应用. 生态学报, 2010, 30(9): 2371-2378.

[6] Scott G D. Plant Symbiosis. London: Edward Arnold, 1969.

[7] 何自力, 徐学军. 生物共生学说的发展与在其他领域的应用研究综述. 企业家天地: 理论版, 2006, (11): 132-135.

[8] 王珍珍, 鲍星华. 产业共生理论发展现状及应用研究. 华东经济管理, 2012, 26(10): 131-136.

[9] Gallopoulos N E, Frosch R A. Strategies for manufacturing. Scientific American, 1989, 261(3): 144-152.

[10] Ehrenfeld J. Putting a spotlight on metaphors and analogies in industrial ecology. Journal of Industrial Ecology, 2003, 7(1): 1-4.

[11] Boyle C A, Baetz B W. A prototype knowledge-based decision support system for industrial waste management: Part II. Application to a Trinidadian industrial estate case study. Waste Management, 1997, 17(7): 411-428.

[12] 马永俊, 胡希军. 城镇群的共生发展研究——以浙中金华城镇群为例. 经济地理, 2006, 26(2): 237-240.

[13] Lowe E A Warren J L, Moran S R. Discovering Industrial Ecology: An Executive Briefing and Sourcebook. Cleveland: Battelle Press, 1997.

[14] Ehrenfeld J. Industrial ecology: A new field or only a metaphor. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(8/10): 825-831.

[15] 衡霞. 基于共生理论的现代农业经营模式研究. 经济研究导刊, 2008, (17): 36-38

[16] Karlsson M, Wolf A. Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(14): 1536-1544.

[17] 李燕. 共生哲学的基本理念. 理论学习, 2005, (5): 73-74.

[18] 聂荣, 钱克明, 潘德惠. 基于 Logistic 方程的创新技术传播模式及其稳定性分析. 管理工程学报, 2006, 20(1): 41-45.

[19] 张庆普, 胡运权. 城市生态经济系统复合 Logistic 发展机制的探讨. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(4): 131-135.

[20] 曹玉责. 企业集群共生模型及其稳定性分析. 华北水利水电学院学报: 社会科学版, 2005, 21(1): 33-35.

[21] Lpez-Ovejero R F, Garcia A G Y, de CarvalhoS J P, Christoffoleti P J, Neto D D, Martins F, Nicolai M. Using thermal units for estimating critical period of weed competition in off-season maize crop. Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes, 2005, 40(1): 1-11.

[22] Misra A K, Lata K, Shukla J B. A mathematical model for the depletion of forestry resources due to population and population pressure augmented industrialization. International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing, 2014, 5(1): 16.

[23] 刘荣增. 共生理论及其在构建和谐社会中的作用. 百家论坛, 2006, (1/2): 126-127.

[24] Kogut B. The stability of joint ventures: reciprocity and competitive rivalry. The Journal of Industrial Economics, 1989, 38(2): 183-198.

[25] Park S H, Russo M V. When competition eclipses cooperation: An event history analysis of joint venture failure. Management Science, 1996, 42(6): 875-890.

[26] 朱鹤健, 何绍福, 姚成胜. 农业资源系统耦合模拟与应用. 北京: 科学出版社, 2009.

[27] 张小峰, 孙启贵. 区域创新系统的共生机制与合作创新模式研究. 科技管理研究, 2013, 33(5): 172-177

[28] Zaccaro S J, Horn Z N J. Leadership theory and practice: Fostering an effective symbiosis. The Leadership Quarterly Bulletin, 2003, 14(6): 769-806.

[29] Fortin M, Ningre F, Robert N, Mothe F. Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak stands in France. Forest Ecology and Management, 2012, (279): 176-188.

[30] Cote R, Wright R. Resource conservation and industrial symbiosis: Strategies for enhancing the environmental sustainability of the Keltic Petrochemical Cluster. Prepared by Eco-Efficiency Centre Dalhousie University, on Mar, 2006,(29):193-210..

[31] 何绍福, 朱鹤健, 于苏建. 优化农业资源利用, 发展特色生态产业——马坪镇特色生态产业体系建设. 三明高等专科学校学报, 2003, 20(2): 45-50.

[32] 程炯, 李新通, 章宪, 林绍华, 叶绿保. 马坪镇生态农业建设途径研究. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 108-109.

[33] 朱鹏颐. 福建省农业生态经济发展态势分析与策略. 西南农业大学学报: 社会科学版, 2013, 11(10): 8-11.

[34] 胡晓鹏. 产业共生: 理论界定及其内在机理. 中国工业经济, 2008, (9): 118-128.